



УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА РОБОТСКОГ НАВАРИВАЊА НА ОСОБИНЕ ИЗРАЂЕНОГ ЕЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИЈЕ ОД ЧЕЛИКА S355

INFLUENCE OF ROBOTIC HARDFACING PARAMETERS ON PROPERTIES OF THE S355 STRUCTURAL STEEL S355 FABRICATED ELEMENT

Милан Радовановић, Себастиан Балаш, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – МАШИНТВО

Кратак садржај - У раду је извршено експериментално наваривање додатног материјала SG2 слој по слој на плочу од конструкционог челика уз помоћ робота. Израђена су три узорка са различитим параметрима и смеровима наваривања. Добијени наварени слојеви су визуелно испитани, испитани су макро пресеци, а извршено је и испитивање затезањем, савијањем и енергија удара. Испитивањем је утврђено да параметри као што су мања струја и напон уз оптималну брзину наваривања као и наизменичног смера наваривања значајно утичу на механичке особине материјала и геометрију добијеног елемента.

Кључне речи: роботско заваривање, МАГ наваривање, механичке особине, WAAM технологија.

Abstract: In this work, experimental welding of the consumable material SG2 layer per layer on a plate of structural steel with the aid of robots was carried out. Three samples were created with different parameters and welding directions. The obtained welded joints were visually tested, macro cross-sections were examined, and tensile testing, bending, and impact energy tests were performed. The experiment found that parameters such as lower current and voltage with the optimal welding speed and the alternating welding direction significantly influence the mechanical properties of the material and geometry of the material.

Keywords: robot welding, GMAW hardfacing, mechanical properties, WAAM technology

1. УВОД

Заваривање је технологија спајања два или више, истих или различитих материјала, топљењем или притиском, са или без додавања додатног материјала. Поступци заваривања, који се најчешће користе у пракси, засновани су на локалном загревању материјала изнад температуре топљења, када заварени спој настаје очвршћавањем (електролучно), или на локалном загревању заварени спој настаје уз додатно деловање притиска [1].

Наваривање је процес нашошења површинског слоја на метални део да би се повећала његова отпорност према абразији, ерозији, ударцима или неком другом облику оптерећења. Процес наваривања је у практичном смислу исти као заваривање, с тим да је његова намена другачија. Основна разлика у односу на метализацију је топљење површине основног материјала и његово мешање са додатним материјалом. За наваривање се највише користи Е, МИГ И ТИГ поступак, а кад је потребно нанети слој на што већу површину примењује се ЕПП или експлозивни поступак [2]. Предмет разматрања овог рада је нова технологија наваривања WAAM-Адитивна производња електричним луком и жицом. WAAM је једна од технологија са највећом брзином нашошења материјала, знатно већом у односу на селективно ласерско синтеровање, при чему је цена опреме значајно нижа. Заснива се на наваривању слоја на претходни слој помоћу робота са извором за заваривање и додавачем жице. Користи се за наваривање великих, скувих металних делова са сложеном геометријом у појединачној производњи или у малим серијама, при чему је једино ограничење у величини производа радни простор робота.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД

За наваривање као основни материјал коришћене су плоче од конструкционог челика S355J2+N дебљине 8 мм, димензија 400 мм × 100 мм, а као додатни материјал жица SG2 произвођача Thyssen energomag, пречника 1,2 мм у заштитном гасу C18 (Ar 82% CO2 18%).

Табела 1. Називни хемијски састав жице SG2 (EN ISO 14341-A-G 42 4 C1/M21 3Si1)

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Cr	%Ni	%Ti
0,07	0,85	1,45	0,02	0,02	0,25	<0,15	<0,15	< 0,05

Табела 2. Механичка својства наноса жицом SG2 (EN ISO 14341-A-G 42 4 C1/M21 3Si1)

Затезна чврстоћа Rm [MPa]	Напон течења Re [MPa]	Издужење A [%]
550	450	>24

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Себастиан Балаш, ванр. проф.

Поступак израде узорака спроведен је на роботској ћелији FANUC Robot ARC Mate 100iC/8L у фирми Proficut у Бачком Петровцу. За извор струје за наваривање коришћен је уређај EWM Phoenix puls 500A са воденим хлађењем.

Димензије узорака су 200мм × 80мм × 5-10 мм. Први узорак је рађен са путањом горионика само у једном смеру и увек са исте тачке у којој се успостављао електрични лук. Путање пиштоља за наваривање преостала два узорка биле су наизменичне, тј. први пролаз са лева у десно, следећи с десна у лево, и тако наизменично.

Током израде зидова, односно приликом наваривања сваког слоја читавани су параметри наваривања (јачина струје и напон).

Након наваривања сваког пролаза помичним мерилом измерена је висина зида и очишћена је горња површина са паузама између сваког пролаза око 2-3 мин. Код израде првог зида (узорак 1) коришћен је гас Ar 82% i CO₂ 18%. Брзина заваривања је била константна и износила је 7 mm/sec. Слободни крај жице је 14 mm, а проток гаса 15 l/min. Остали параметри заваривања, као што су: јачина струје, напон, висина сваког пролаза и унесена топлота, приказани су у табели 3.

Табела 3. Параметри наваривања првог зида

Пролаз	Висина, [mm]	Јачина струје, [A]	Напон, [V]	Брзина жице [m/min]	Унесена топлота, [kJ/cm]
1.	3	160	23,9	6	4,37
2.	5	150	23,4	5,5	4,01
3.	6,7	140	23	5	3,68
4.	8,2	131	22,5	4,5	3,36
5.	9,8	121	22,1	4	3,05
6.	11,3	107	21,3	3,5	2,60
50.	77,3	107	21,3	3,5	2,60
51.	78,5	107	21,3	3,5	2,60
52.	80	107	21,3	3,5	2,60

Код израде другог зида (узорак 2) коришћен је гас Ar 82% CO₂ 18%. Брзина заваривања је константна и износи 10 mm/sec. Слободни крај жице је 15 mm, а проток плина 15 l/min. Остали параметри заваривања приказани су у табели 4.

Табела 4. Параметри наваривања другог зида

Пролаз	Висина, [mm]	Јачина струје, [A]	Напон, [V]	Брзина жице [m/min]	Унесена топлота, [kJ/cm]
1.	2,5	160	23,9	6	3,05
2.	4,4	160	23,9	6	3,05
3.	5,6	160	23,9	6	3,05
4.	6,8	160	23,9	6	3,05
5.	8	160	23,9	6	3,05
54.	78,5	160	23,9	6	3,05
55.	80	160	23,9	6	3,05
56.	81	160	23,9	6	3,05

Код израде трећег зида (узорак 3) коришћен је исти гас. Брзина заваривања је константна и износи 13 mm/sec. Слободни крај жице је 15 mm, а проток плина 15 l/min. Остали параметри заваривања приказани су у табели 5.

Табела 5. Параметри наваривања трећег зида

Пролаз	Висина, [mm]	Јачина струје, [A]	Напон, [V]	Брзина жице [m/min]	Унесена топлота, [kJ/cm]
1.	2,5	184	23,7	7	2,68
2.	4,3	184	23,7	7	2,68
3.	5,8	184	23,7	7	2,68
4.	7	184	23,7	7	2,68
5.	8,4	184	23,7	7	2,68
59.	79,5	184	23,7	7	2,68
60.	80,9	184	23,7	7	2,68
61.	81,6	184	23,7	7	2,68

Мора се напоменути да су сва три узорка рађена на температури око 0° целзијуса, као и да се хала која није имала грејање периодично отвара и проветравала током саме израде узорака, па се доводи упитање утицаја промаје, повећане влажности као и смрзавање гаса у боци. Након наваривања извршено је испитивање узорака у Лабораторији за испитивање материјала на Факултету техничких наука у Новом Саду. Поступак испитивања је урађен у складу са стандардом SRPS EN ISO 15614. Извршено је макро испитивање, испитивање затезањем, савијањем и енергија удара. Поступак испитивања узорака на затезање и на савијање је урађен на једноосној машини за затезање тј. кидалици типа ВЕБ ЗДМ 5/91. Испитивање жилавости је рађено на инструментираним Шарпијевом клатну JWT-450 у радном опсегу 450 J. При испитивању макро структуре у оба случаја извршено је исецање узорака са бруслицом, након тога извршено је постепено брушење са шмирглом класе р80 па до р2500, након тога је извршено полирање узорака и нагрзање које је рађено са 3% ниталом (3% азотна киселина HNO₃ у алкохолу).

3. РЕЗУЛТАТИ

3.1 Резултати макро испитивања

Макро анализа рађена је на сва три узорка што се може видети са слике 1.



а) б) в)
Слика 1. Макро испитивање: а) узорак 1, б) узорак 2, в) узорак 3

Прегледом макроструктуре уочена је нагнутост на сва три узорка, а посебно се истиче на узорку 2 и 3. На узорку 1 се види равномерније слагање слојева у односу на друга два узорка, док је на месту завршетка лука најмањи прираштај висине што се може видети са слике а) леви узорак.

На последњем пролазу код сва три узорка могу јасно видети стубасти кристали. Видљива је порозност на сва три узорка а највећа је уочена на узорку 3.

3.2 Резултати испитивања затезањем

Резултати испитивања узорка на затезање приказани су у табели 6. На основу резултата може да се констатује да је највећа добијена вредност напона течења и затезне чврстоће постигнута на узорку 2 као и средња вредност која одговара прописаном стандарду EN10025. Најнижа вредност напона течења и затезне чврстоће добијена је на узорку 3.

Код свих узорка који су испитивани затезањем дошло је до лома епрувете на различитим местима, уз претходно формирање врата на епрувети насталог услед деформације затезањем. На слици 2 приказана је епрувета и изглед лома након испитивања узорка затезањем.

деловању силе унутрашњи напони немају довољну јачину да се супроставе деформацији и долази до отварања.



Слика 2. Изглед епрувете након испитивања затезањем: а) узорак 1, б) узорак 2, в) узорак 3

Табела 6. Резултати испитивања затезањем

Узорак	Епрувета	R_p [MPa]	R_m , [MPa]	A [%]
1	11	439	484	28
	13	455	518	30
	17	402	500	32
	Ср. вредност	432	501	30
2	21	488	536	26
	23	465	543	30
	27	466	540	28
	Ср. вредност	473	539	28
3	31	242	252	6
	33	396	443	35
	37	451	473	12
	Ср. вредност	363	389	18
Механичке особине челика S355J2+N по стандарду EN10025		355-550	490-630	>22

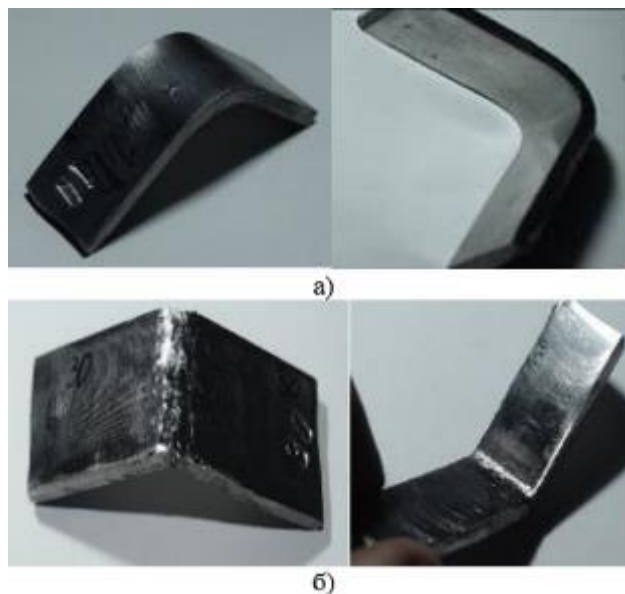
3.3 Резултати испитивања савијањем

Резултати испитивања видљиви су на узорцима са слике 3. где су приказана два узорка један најбољи и један најлошији. На основу резултата датих у табели 7. може да се констатује да код узорка 1 испитиваног савијањем преко лица није дошло до појаве прслине тј. отварања епрувете, док је код узорка 3 дошло до отварања.

Остали узорци из групе узорка 1 су имали чисту површину без прслина. Док код узорка из групе 3 постоји велика порозност код свих узорка па при

Табела 7. Резултати испитаних узорка на савијање

Узорак 1	Прслина мања од 2 мм
Узорак 2	Четири прслине мање од 1 мм са спољне стране, шест мањих од 2 мм са унутрашње
Узорка 3	Велика порозност на свим узорцима

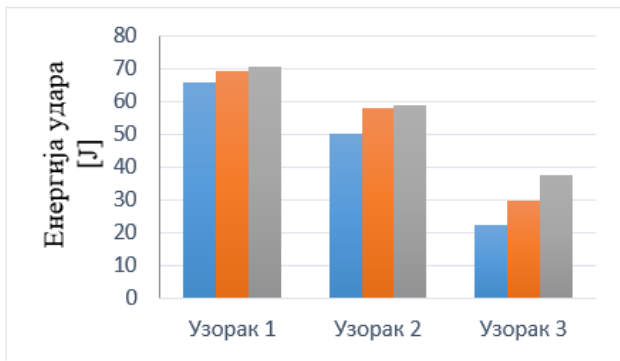


Слика 3. Узорци након испитивања на савијање: а) узорак 1, б) узорак 3

3.4 Резултати испитивања енергије удара

Са слике се види да узорак 1 у односу на друга два узорка поседује веће вредности жилавости материјала.

Мале вредности узорка 3 можемо преписати порозној структури која је последица спољашњих фактора и нешто већим вредностима параметара заваривања.



Слика 4. Вредности енергије удара за сва три узорка



Слика 5. Узорци након испитивања на Шарпију

4. ДИСКУСИЈА

При испитивању узорака на затезање израчунате су средње вредности за сва три узорка и упоређене са стандардним прописаним вредностима за конвенционално произведен челик основе на коју је извршено наваривање (ваљане плоче), тако да се узорци 1 и 2 налазе у прописаним вредностима за R_p , R_m и A , док се код узорка 3 једино напон течења налази у прописаним вредностима.

Током испитивања на савијање најмања прслина се јавила на узорку 1 док код других узорака добијених из узорка 1 нису јавиле прслине. На свим узорцима из узорка 3 се јасно види порозност што је довело до отварања материјала. Такође се јасно види да је узорак 3 има најмање вредности при испитивању на енергију удара, што значи да је жилавост на том узорку најслабија.

При макро испитивању јасно се види да на узорку 3 узорци имају највише изражену порозност, као и геметријуску нетачност. У табели 8. приказано је поређење просечне висине сваког слоја и просечног уноса топлоте код узорака. Из таблице је видљиво да код узорка 1 имамо нешто већу просечну висину у односу на друга два узорка.

Такође видимо да је унос топлоте узорка 1 сличан узорку 3 иако су параметри наваривања напон, струја и брзина наваривања различити. Може се констатовати да је највећа вредност просечне висине слоја код узорка 1 у односу на друга два узорка добијена због утицаја мале јачине струје као и нижег напона лука.

То значи да када су вредности веће од оптималних долази до већег претапања предходног слоја као и цурења са стране.

Табела 8. Просечна висина слоја и унесена топлота за сва три узорка

Узорак	Просечна висина слоја, [mm]	Просечан унос топлоте, [kJ/cm]
Узорак 1	1,54	2,71
Узорак 2	1,45	3,05
Узорак 3	1,34	2,68

5. ЗАКЉУЧАК

На основу спроведених испитивања и анализа резултата може се закључити следеће:

- Током анализе резултата може се приметити да су најбољи резултати добијени на узорку 1 и 2, па се може закључити да мала јачина струје са оптималном брзином заваривања и напоном омогућава WAAM технологији мањи број пролаза до задате висине, бољу распоређеност растопа, мање прскање и изливање, као и готово минималну порозност. Треба напоменути да је узорак 1 рађен у једном правцу и да је јасно видљив утицај топлоте на почетку заваривања и на крају па је и сама геометрија узорка другачија у односу на друга два узорка која су рађена са наизменичним наваривањем.

- На узорку 3 је уочена знатно већа порозност и већи број пролаза као и веће прскање у односу на остала два узорка. Сматра се да је разлог те порозности већа брзина заваривања, већа јачина струје и напона као и утицај средине.

6. ЗАХВАЛНОСТ

Резултати презентовани у овом раду су реализовани у оквиру пројекта „Истраживање и примена савремених метода карактеризације материјала и заварених спојева у производном машинству“, Департмана за производно машинство, ФТН Нови Сад.

7. ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Палић В., Сабо Б.: Технологија заваривања, Факултет техничких наука, Нови Сад 2003
- [2] Група аутора: Поступци заваривања и опрема за заваривање (наваривање), Завод за заваривање, број док.: 1.14. стр. 1, 2004.
- [3] Стандард SRPS EN ISO 15614-1:2017

Кратка биографија:



Милан Радовановић рођен у Новом Саду 1992. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Машинство – Материјали и технологије спајања одбранио је 2019. године.



Проф. др. Себастијан Балаш рођен је у Сомбору 1974. год. Докторирао је на Факултету техничких наука 2010. год., а 2016. год. је биран у звање ванредног професора из уже научне области Материјали и технологија спајања.